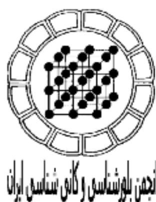
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارهٔ سوم، پاییز ۱۴۰۲، از صفحهٔ ۵۳۷ تا ۵۵۲



کانی شناسی، زمین شیمی و سیال‌های درگیر در کانسار آهن بالستان، واقع در جنوب شرق ارومیه، شمال غرب ایران

اصغر براتی لک*[۱]، یوسف رحیم سوری[۱]، زهرا بنیادی[۲]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۵، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴)

چکیده: کانسار آهن بالستان در ۵۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان ارومیه قرار دارد. سنگ میزبان اصلی کانه‌زایی در این کانسار واحد کوارتز سریسیت شیست وابسته به پرکامبرین پسین است. کانه‌زایی اغلب موازی با شیستوارگی سنگ میزبان است. با وجود این، ساخت پرکننده فضای خالی نیز بسیار در پهنه‌های گسلی یافت می‌شود. براساس شواهد صحرایی و بررسی های میکروسکوپی، کانه‌زایی غالب آهن به صورت مگنتیت است که همراه با پیریت و کالکوپیریت دیده می‌شود. بررسی‌های زمین شیمیایی نشان می‌دهد که الگوی پراکندگی عناصر کمیاب و فرعی و اکسیدهای اصلی در کانسار آهن بالستان شباهت بسیاری به سایر کانسارهای آهن گرمابی دارد. بررسی های ریز دماسنجی میانگین دمای همگن شدگی را ۲۷۶ درجه سانتی‌گراد و شوری را ۷/۳۰ درصد وزنی معادل نمک طعام برای سیال‌های درگیر نشان می‌دهد. بر این اساس، کانسار آهن بالستان را می‌توان در رده کانسارهای متوسط دما با روند سردشدگی یا در فشار بودن برای تکامل سیال در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: *کانسار آهن گرمابی؛ زمین شیمی؛ سیال‌های درگیر؛ بالستان؛ پهنه سنندج-سیرجان.*

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]

[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]

مقدمه

کانسار آهن بالستان در مختصات جغرافیایی ″۵۶ '۲۳ °۴۵ طول شرقی و ″۵۶ '۰۸ °۳۷ عرض شمالی، در فاصله ۵۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی (شمال غرب ایران) واقع است. کانسار آهن بالستان در بخش شمالی پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان قرار دارد [۱]. با وجود بررسی‌های جامع انجام شده بر سیماهای زمین شیمیایی کانسارهای آهن در ایران، تاکنون پژوهشی پیرامون این ذخیره معدنی انجام نشده است. بررسی های زمین شناسی ناحیه‌ای در این منطقه تنها در قالب نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ [۲] بوده است (شکل ۱).

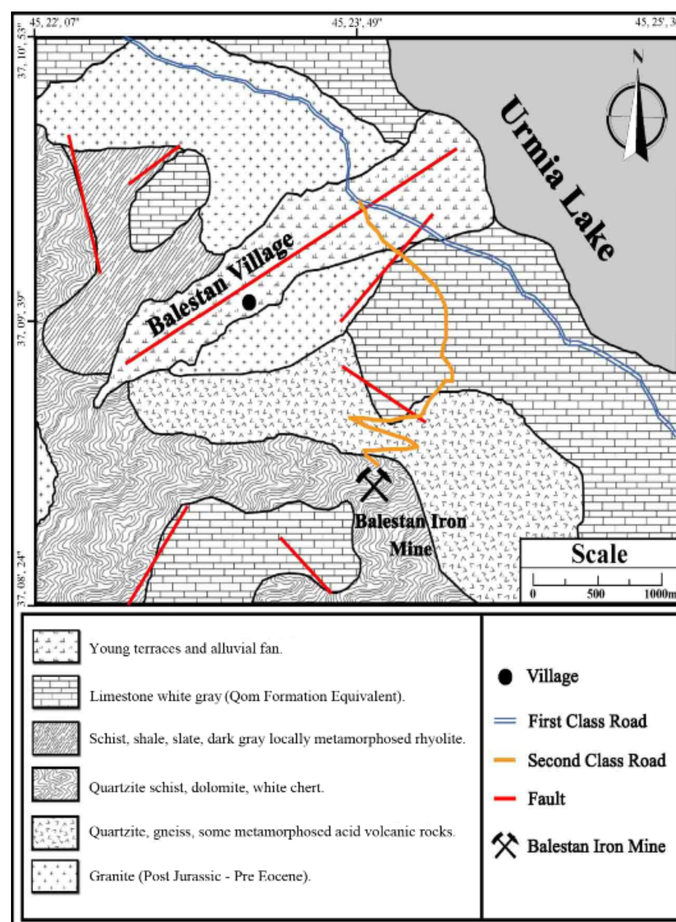
در این پژوهش با ترکیب بررسی‌های صحرایی، آزمایشگاهی و زمین شیمیایی، شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تشکیل کانسار آهن بالستان و خاستگاه سیال کانسارساز بر پایه بررسی سیال‌های درگیر تعیین می‌شود. همچنین بررسی روند الگوهای عناصر خاکی نادر به همراه رفتار زمین شیمیایی عناصر کمیاب و اکسیدهای اصلی در تعیین ماهیت سیال کانسارساز و شرایط زمین شیمیایی تشکیل کانسار بسیار موثر است. بر این اساس و با شناسایی چگونگی تشکیل این کانسار و مقایسه آن با کانسارهای مشابه در سایر نقاط جهان، امید است نتایج این پژوهش منجر به اکتشاف کانسارهای مشابه در منطقه مورد بررسی و سایر نقاط کشور شود.

روش بررسی

برای بررسی‌های کانی‌شناسی، کانه‌نگاری و سیال‌های درگیر، نمونه‌برداری از سنگ میزبان کانی‌سازی و پهنه‌های کانه‌دار و دگرسان کانسار آهن بالستان انجام گردید. براین اساس، تعداد

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۴۳۱۹۴۲۱۳۹، نمابر: ۰۴۴۳۲۷۵۳۱۷۲، پست الکترونیکی: asghar.b.lak@gmail.com

۱۰ مقطع نازک، ۱۰ مقطع صیقلی و ۱۰ مقطع دوبر صیقلی تهیه شد (۱۰ نمونه سنگ میزبان و بقیه کانسنگ). بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانه‌نگاری در آزمایشگاه کانه‌نگاری و کانی‌شناسی دانشگاه ارومیه انجام شد. سیال‌های درگیر با استفاده از تجهیزات لینکام (Linkam)، صفحه گرم کننده-سرد کننده (THMS 600) سامانه کنترل دمای TP و سامانه کنترل سرمایش LNP)و میکروسکوپ زایش، Axioplan2 مجهز به دوربین عکس‌برداری و فیلم‌برداری برای ثبت تغییرات فازی در دانشگاه تربیت مدرس بررسی گردیدند. تجهیزات نخست با استانداردهای غیرآلی مرک (Merk) واسنجی شدند. خطای واسنجی برای داده‌ها تا 0.2°C برای دوره‌های سرد شدن و با استفاده از ان‌هگزان (با نقطه ذوب ۹۴٫۳- درجه سانتی‌گراد) و 0.6 °C برای دوره‌های گرم شدن و براساس نیترات سزیم (با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد) است. بررسی‌های زمین‌شیمی به صورت نمونه‌برداری غیر اصولی و انتخابی از واحدهای سنگی مختلف از جمله سنگ میزبان، کانسنگ و همچنین سنگ‌های آذرین موجود در منطقه صورت گرفت، که سعی شد از سنگ‌های سالم و بدون هوازدگی، نمونه‌ای با وزن دست کم ۱ کیلوگرم برداشت شود. نمونه‌ها به طور جداگانه به منظور جلوگیری از آلودگی در کیسه‌های پلاستیکی قرار دادند و روی کیسه‌ها شماره گذاری شد. در مجموع، تعداد ۱۷ نمونه از انواع مختلف سنگ‌ها انتخاب و به دقت شسته و در کوره خشک و سپس خرد و در آسیاب (Tema) پودر گردیدند. از میان این نمونه‌ها، تعداد ۱۰ نمونه برای عناصر اصلی با طیف‌سنج فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) تجزیه شدند و تعداد ۱۰ نمونه (کانسنگ و سنگ میزبان) نیز برای تعیین عناصر اصلی، عناصر جزئی و عناصر خاکی نادر به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) به آزمایشگاه زرآزما ارسال گردیدند. برای تهیه نمودارهای مورد نیاز از نرم افزارهای Excel 2019، GCDkit 2.1.1 و SPSS 26.0 استفاده شد.



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی برگرفته از مرجع [۲] با کمی تغییرات.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]

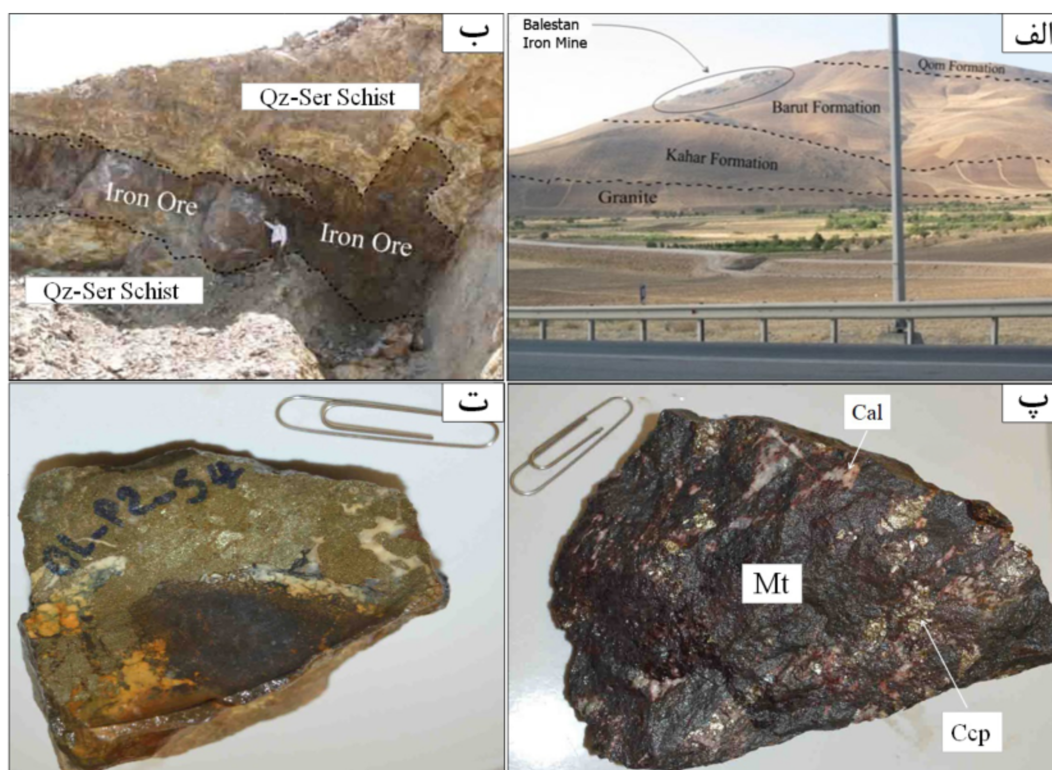
نتایج و بحث

زمین شناسی

منطقه مورد بررسی در دورترین بخش شمال غربی پهنه سنندج - سیرجان واقع است. تشکیلات دگرگون شده پرکامبرین پیشین در برآمدگی‌ها و ارتفاع‌های پیرامون منطقه رخنمون دارند و در بعضی بخش‌ها با رسوب‌های جوان‌تر پرکامبرین پسین تا عهد حاضر پوشیده شده‌اند. از ویژگی‌های مهم زمین‌شناسی این منطقه می‌توان به وجود و تداوم بخشی از پهنه توروس خارجی ترکیه اشاره کرد که براساس تداوم رسوب‌گذاری در گستره زمانی پرمین تا تریاس پیشین قابل تشخیص است. پی‌سنگ پرکامبرین پسین در این منطقه بیش از ۷۰۰ متر ضخامت دارد و شامل مجموعه سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده در حد رخساره شیست سبز تا آمفیبولیت، مرمر، شیست و دیگر سنگ‌های دگرگونی تفکیک شده است. این پی‌سنگ، که سازند سیلوانا نامیده شده، دارای رخساره نزدیک به سازند کهر است و ضخامت آنها تا حدود ۴۰۰ متر برآورد می‌شود [۱].

از سنگ‌های زمان پالئوزوئیک پیشین، رخنمون‌هایی از سازند باروت، میلا و پرمین در این منطقه حضور دارند که در این میان تغییر رخساره سازند میلا و اختلاف سنگ‌شناسی آن با سایر نقاط رشته کوه البرز قابل توجه است. در این منطقه، رسوب‌های تشکیل شده از شیل، شیل‌های لای‌دار و رسی و ماسه سنگ میکادار بدون دگرشیبی مشخص روی سازند کهر قرار دارند. سازند میلا با سن کامبرین میانی و پسین، شامل دولومیت و آهک‌های دولومیتی لایه‌ای است که در زیر آهک‌-های کربناتی، سازند میلا با ۱۰۰ متر ضخامت قرار دارد و به احتمال بسیار معادل عضو پنج از سازند میلا با سن اردوویسین است [۲].

بارزترین واحدهای سنگی در منطقه مورد بررسی کوارتزیت و کوارتز سریسیت شیست هستند. کانی‌سازی آهن در منطقه بالستان درون واحد کوارتز سریسیت شیست رخ داده که به طور عمده با ساخت‌های توده‌ای، لامینه‌ای (لایه‌ای) و گاهی عدسی شکل همراه است (شکل ۲). پی‌سنگ منطقه مورد بررسی به نظر می‌رسد که واحدهای سنگی سازند کهر باشد که از فیلیت و شیست با مقادیری کوارتزیت تشکیل شده است.



شکل ۲ (الف) نمایی از نفوذ توده گرانیتی به درون سازندهای کهر و باروت و پوشیده شدن این واحدها با سنگ آهک معادل سازند قم (دید به سمت جنوب غربی)، (ب) رخداد کانه‌زایی آهن در راستای تورق سنگ میزبان، (پ و ت) نمونه‌های دستی از کانسنگ مگنتیت به همراه پیریت و کالکوپیریت. کلسیت: Cal، مگنتیت: Mt، پیریت: Py، کالکوپیریت: Ccp [۳]).

سازند کهر با کوارتز شیست به همراه مقدار کمی دولومیت پوشیده می‌شود و مرز تدریجی بین آنها قابل تشخیص است. توده‌ای گرانیتی با سن پس از ژوراسیک و پیش از ائوسن به درون پی سنگ نفوذ کرده و هاله دگرگونی مجاورتی به نسبت گسترده‌ای در محل‌های تماس ایجاد نموده است. بر اثر این دگرگونی، کانی‌های گارنت، کوردیریت، آندالوزیت و سنگ‌های مرمر شکل گرفته‌اند. خاستگاه این گرانیت به باتولیت موجود در زیر لایه‌های عمیق منطقه مورد بررسی نسبت داده شده است [۲]. توده گرانیتی با توجه به گستره سنی بیان شده به احتمال بسیار در ارتباط با رخداد زمین‌ساختی سیمرین پسین - لارامید است. این واحد گستره وسیعی از مناطق غربی و شمال غربی منطقه مورد بررسی را در بر می‌گیرد (شکل ۱). لایه کوارتز سریسیت شیست و شیست‌های منطقه مورد بررسی که سنگ میزبان ماده معدنی هستند، با بافت و ساخت لایه‌ای به خوبی قابل تشخیص است [۲].

واحد کوارتز سریسیت شیست به سن پرکامبرین پسین، سنگ میزبان کانسار آهن بالستان است که از نظر چینه‌نگاری معادل سازند باروت بوده که دگرگون شده است (شکل ۲ الف). سازند آهکی (معادل سازند قم) با بافتی ریزدانه و میان لایه‌های مارنی به رنگ کرم با سن میوسن و با ناپیوستگی روی لایه شیستی قرار دارد.

کانی‌شناسی

کانه‌زایی آهن در بالستان بیشتر در راستای سطوح لایه‌بندی سنگ میزبان و نیز به صورت بافت‌های پرکننده فضاهای خالی (شکل ۲ ب) و بیشتر با یک شیب تقریباً متوسط به موازی با لایه‌بندی سنگ میزبان رخ داده است. در رخنمون صحرایی فقط بخش کانسنگ آهن در سطح زمین برونزد یافته است. در نتیجه تشکیل شکستگی‌های فراوان در سنگ میزبان در اثر فعالیت‌های زمین‌ساختی در منطقه و پرشدن بخش اصلی این شکستگی‌ها با سیال کانه‌دار، ساخت و بافت‌های پرکننده فضاهای خالی ایجاد شده‌اند. نمونه‌های دستی کانسنگ دربردارنده مگنتیت به همراه پیریت و کالکوپیریت هستند. افزون بر پرشدگی شکستگی‌ها و فضاهای خالی با سیال کانه‌دار، گاهی بخش عمده‌ای از کانی‌های اولیه سنگ میزبان شیست نیز با کانی‌های فلزی چون مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت و کانی‌های باطله کلسیت و کوارتز جانشین گردیده و موازی با تورق سنگ میزبان تشکیل شده‌اند (شکل‌های ۲ پ و ت).

سنگ میزبان کانه‌زایی آهن در منطقه مورد بررسی اغلب از نوع کوارتز- سریسیت شیست است. کوارتز و سریسیت فراوان ترین کانی‌های موجود در شیست‌ها هستند و فشارهای جهت‌دار ناشی از دگرگونی، منجر به جهت یافتگی این کانی‌ها شده است. کواتز در اثر فشارهای زمین‌ساختی اغلب به شدت خرد و شکسته شده و مرز بلورین آنها در اثر فشارهای وارده دندانه‌دار است. کانی سریسیت در اثر دگرگونی به صورت رشته‌هایی به دور کانی مقاوم کوارتز کشیده شده است (شکل ۳ الف). کلریت نیز با فراوانی کمتر نسبت به کانی‌های نام برده همراه با سنگ میزبان کوارتز سریسیت شیست و در پهنه‌های کانه‌دار دیده می‌شود (شکل ۳ ب).

کانه‌نگاری

کلسیت به‌عنوان یک کانی باطله همراه با کانه‌زایی آهن دیده می‌شود. این کانی افزون بر همراهی با مگنتیت، پیریت و کالکوپیریت در نمونه دستی و زیر میکروسکوپ، با کوارتز نیز مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳ ب و پ).

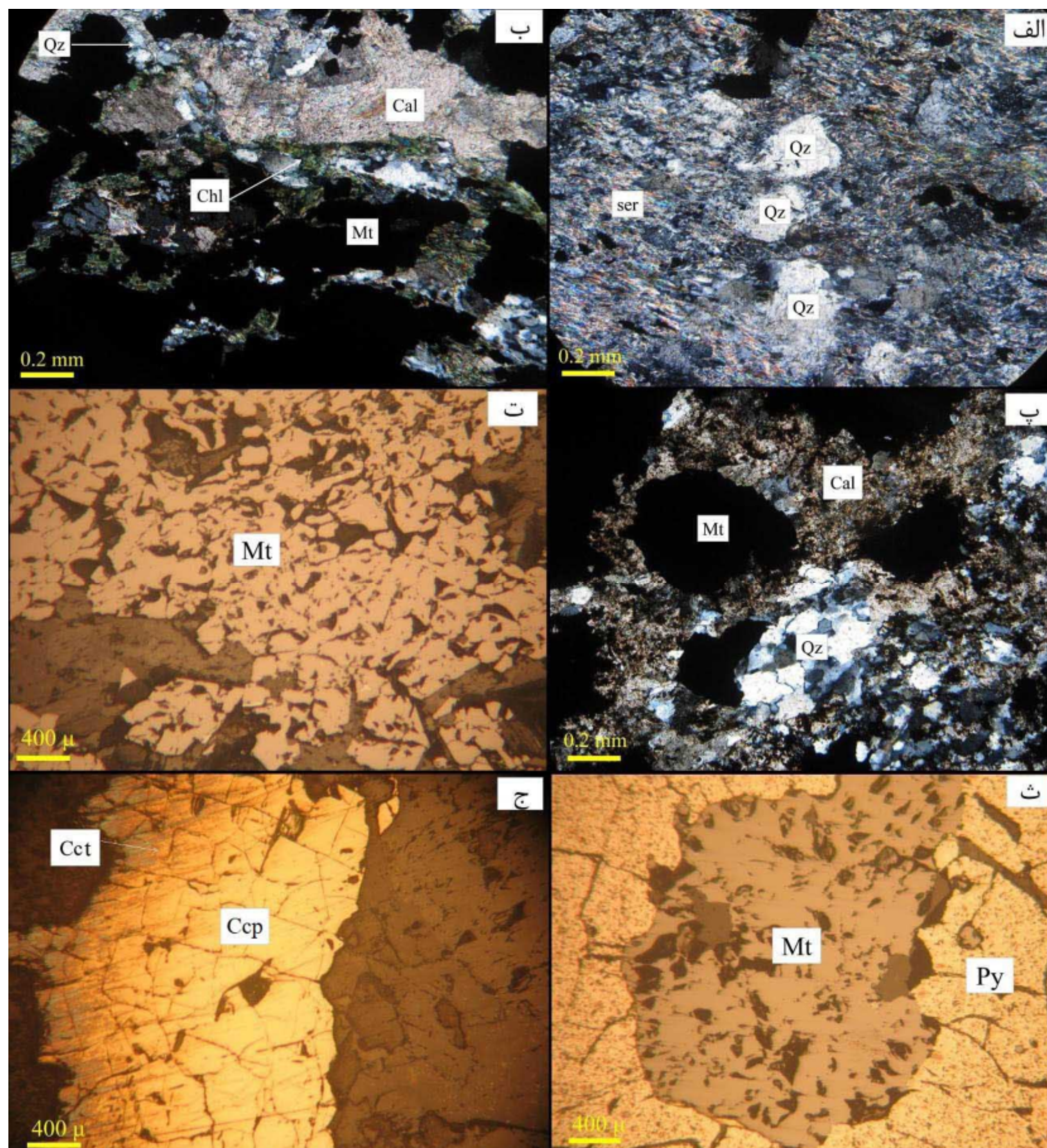
مگنتیت فراوان‌ترین کانه آهن در کانسار بالستان است. در نمونه‌های دستی، رخنمون‌های صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، مگنتیت به همراه هماتیت و لیمونیت برآمده از هوازدگی دیده می‌شود. مگنتیت در زیر میکروسکوپ اغلب بی-شکل و بدون اکسایش شدید بوده و تنها به صورت بسیار جزئی و از لبه‌ها به هماتیت تبدیل شده است (شکل‌های ۳ ت و ث). پیریت و کالکوپیریت پس از مگنتیت فراوان‌ترین کانی فلزی در این کانسار هستند که در پی تغییر شرایط اکسایشی سیال کانه‌دار به احیایی (غنی از گوگرد) و در دمای پایین‌تر تشکیل شده‌اند. بر اساس بررسی های کانه‌نگاری، پیریت‌ها بیشتر بی-شکل، دارای سطح یکدست و به ندرت نیمه‌خودشکل هستند و اغلب مگنتیت‌ها را دربرگرفته‌اند (شکل ۳ ث). کالکوپیریت فراوانی کمتری نسبت به مگنتیت و پیریت دارد و در برخی از بخش‌ها و از لبه بلور و در راستای سطوح رخ به کالکوسیت تبدیل شده است (شکل ۳ ج).

بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که سنگ میزبان اغلب دارای بافت خلیجی و جریانی بوده که در اثر حرکت گدازه یا مواد آذرآواری ایجاد شده است و در سنگ‌های آتشفشانی

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]

پیرامون ذخیره آهن دیده می‌شود. از ویژگی‌های بافت جریانی جهت‌یافتگی در یک راستای مشخص (در سریسیت و گاهی کوارتز) بوده که ناشی از جریان گدازه است (شکل ۳ الف).

همچنین بافت خلیجی که بیانگر وجود حالت خوردگی در کانی بوده نتیجه واکنش با مواد مذاب است. کوارتز گدازه‌های سیلیسی اغلب نه‌تنها گرد است، بلکه کناره‌های آن نیز خورده شده‌اند. در این حالت، بی‌شکل بودن دانه‌های کوارتز به‌علت انحلال دوباره کوارتز در سیال پیرامون خود و واکنش با آن شکل گرفته‌اند. در بسیاری از موارد بلورهای اولیه کوارتز شکل‌دار هستند که بافت خلیجی در بلورهای ثانویه بصورت خورده شده در لبه‌های آن نمود یافته است (شکل‌های ۳ الف و ب).



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی سنگ میزبان و کانسنگ آهن بالستان: الف) سنگ میزبان کوارتز- سریسیت شیست بدون کانه‌زایی که جهت یافتگی کوارتز و سریسیت در آن قابل مشاهده است (نور قطبیده متقاطع، xpl)، ب) کلسیت، کوارتز و کلریت همراه با کانه‌زایی (نور xpl)، پ) کلسیت و کوارتز برآمده از دگرگونی و همراه با کانه‌زایی (نور xpl)، ت) مگنتیت (نور بازتابی)، ث) مگنتیت به همراه پیریت (نور بازتابی)، ج) کالکوپیریت که از لبه و در راستای سطوح رخ به کالکوسیت تبدیل شده است (نور بازتابی). کوارتز: Qz، کلسیت :Cal، کلریت: Chl، سریسیت: Ser، مگنتیت: Mt، پیریت: Py، کالکوپیریت: Ccp، کالکوسیت: Cct [۳]).

زمین شیمی

بر اساس نتایج تجزیه عناصر اصلی به روش XRF (جدول ۱)، مقدار اکسید آهن کانسنگ از ۶۲/۱ تا ۹۰/۳ درصد وزنی در کانسار بالستان متغیر است. مقادیر بالای آهن مربوط به تشکیل آهن به صورت فازهای اکسیدی چون مگنتیت و هماتیت و وجود محیط اکسایشی در زمان تشکیل کانسنگ آهن است. تغییرات گسترده مقدار آهن در نمونه‌های کانسنگ به دلیل کانی‌سازی ثانویه آهن در شکستگی‌ها و سطوح لایه‌بندی سنگ میزبان است که تشکیل اکسیدهای آهن از فرایند پر کردن فضاهای خالی در سنگ‌های میزبان را تایید می‌کند. پایین بودن مقادیر فسفر (زیر ۰/۲ درصد وزنی، جز در نمونه BA-2 که دارای مقدار جزئی کانی آپاتیت است) خاستگاه ماگمایی این کانسار را رد می‌کند، زیرا فسفر تمایل به ورود به محلول‌های گرمابی را ندارد و ترجیح می‌دهد که وارد سیال‌های ماگمایی شود [۴].

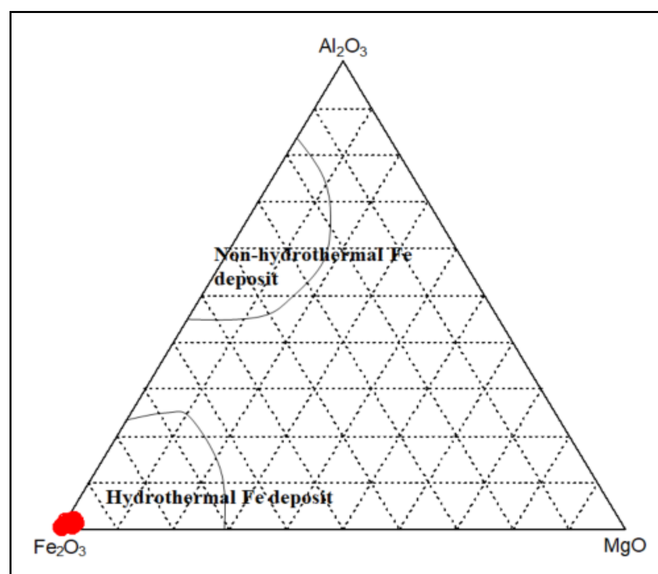
بیشترین مقدار اکسید منگنز در نمونه‌های کانسنگ آهن حدود ۰/۲۴ درصد وزنی است که با توجه به نبود کانی‌های مستقل منگنز در مقاطع میکروسکوپی، برای این مقدار منگنز می‌توان جانشینی Fe^{+2} با Mn^{+2} در شبکه مگنتیت را می‌توان در نظر گرفت که دلیلی بر مقدار بسیار پایین عنصر Mn در سیال گرمابی اولیه است.

مقدار آلومینیم در نمونه‌های کانسنگ تا ۱/۵۶ درصد وزنی می‌رسد که وجود کانی‌های سیلیکاتی چون سریسیت، مسکویت و کلریت را همراه با کانه‌زایی آهن نشان می‌دهد [۵]. از نمودار اکسید آهن- اکسید آلومنیم- اکسید منیزیم (شکل ۴) برای تفکیک ذخایر گرمابی از ذخایر غیر گرمابی آهن استفاده شد [۶]. بر این اساس، نمونه‌های آهن بالستان در گستره ذخایر گرمابی آهن واقع هستند.

جدول ۱ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی در نمونه‌های کانسنگ آهن (BA-1 تا BA-7) و سنگ میزبان کوارتز سریسیت-شیست (BA-8 تا BA-10) در کانسار آهن بالستان (بر حسب wt%).

Sample No/	BA-1	BA-2	BA-3	BA-4	BA-5	BA-6	BA-7	BA-8	BA-9	BA-10
Type Sample	کانسنگ آهن							سنگ میزبان		
								کوارتز سرسیت شیست		شیست
SiO_2	۲/۶۱	۵/۳۱	۸/۲۴	۱۹/۰۷	۵/۰۹	۹/۶۵	۱۳/۷۲	۵۰/۴۹	۷۶/۰۷	۴۴/۹۴
Al_2O_3	۱/۵۳	۰/۹۲	۰/۵۰	۰/۳۳	۱/۴۲	۱/۵۶	۱/۳۳	۰/۷۵	۱۲/۵۱	۲۲/۱۶
Fe_2O_3	۹۰/۲۹	۶۲/۷۶	۶۵/۹۰	۷۸/۳۸	۷۹/۱۵	۸۲/۴۴	۶۲/۱۰	۴۰/۲۶	۲/۳۴	۱۰/۶۹
MgO	۱/۵۲	۱/۳۹	۱/۳۲	۰/۱۷	۰/۲۲	۱/۴۰	۳/۷۷	۰/۱۹	۰/۶۵	۵/۱۵
CaO	۲/۵۱	۱۳/۶۵	۱۳/۳۷	۰/۱۱	۵/۷۴	۰/۰۹	۹/۲۲	۰/۵۹	۰/۲۳	۰/۷۳
Na_2O	۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	<۰/۰۱	۰/۰۷	<۰/۰۱	۶/۵۸	۰/۰۷
K_2O	۰/۰۵	۰/۴۹	۰/۱۸	۰/۰۵	۰/۵۷	۰/۹۲	۱/۰۵	۰/۲۸	۰/۰۶	۱۰/۲۷
TiO_2	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۲۹	۰/۱۴	۱/۰۶
P_2O_5	۰/۲۰	۲/۶۰	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۴۶	<۰/۰۰۵	۰/۲۲
MnO	۰/۰۸	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۰۴	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۱۱	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵
Cr_2O_3	۰/۰۰۵	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	<۰/۰۰۲	<۰/۰۰۲
LOI	۱/۰	۱۲/۵	۱۰/۰	۱/۶	۷/۵	۳/۷	۸/۴	۶/۴	۱/۲۰	۴/۱۶

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]



شکل ۴ موقعیت نمونه‌های آهن بالستان در نمودار اکسید آهن- اکسید آلومینیم- اکسید منیزیم [۵].

مقدار افت گرمایی (LOI) که برابر با مقدار آب، دی اکسیدکربن و مواد فرار موجود در نمونه است و می‌تواند به نوعی میزان هوازدگی را نیز نشان دهد، به‌طور میانگین ۶٫۳٪ wt و نشانگر همبستگی منفی ضعیفی (۰٫۵۸-) نسبت به Fe_2O_3 است. بر این اساس، می‌توان گفت که Fe_2O_3 بیشتر در کانسنگ‌های مورد بررسی در فازهای بدون آب حضور دارد. نتایج تجزیه شیمیایی عناصر جزئی به روش ICP-MS در جدول ۲ آورده شده است. مقادیر طلا، نقره و مس در کانسار آهن بالستان بسیار پایین (به ترتیب ۱۶٫۲، ۰٫۸ و ۲۹٫۲ ppm) است و وجود کانه‌زایی از نوع ذخایر اکسید آهن-مس-طلا (IOCG) را رد می‌کند. در این کانسار، مقدار کروم ۵۰ ppm و مقدار وانادیوم حدود ۴۷ ppm است که می‌توان آن را در گروه ذخایر آهن گرمابی قرار داد [۷].

نسبت Cr/V در اغلب ذخایر آهن ماگمایی و رسوبی کمتر از ۰٫۱ ولی در ذخایر آهن گرمابی بیش از ۰٫۱ است [۷]. با محاسبه این نسبت برای کانسار بالستان (۰٫۴۳) می‌توان آن را از ذخایر گرمابی رده‌بندی کرد. بر اساس میانگین مقدار عناصر جزئی Cr، V، Co، Ni، Cu و Zn و اکسیدهای اصلی Al، Mn، Mg و Ti کانسار آهن بالستان بیشترین شباهت و همخوانی را با ذخایر آهن گرمابی آیرون اسپرینگزا (کانادا) [۸] معدن پونتادل کوبره (شیلی)، [۹][معدن ایگاراپیا باهیا (برزیل) [۱۰] نشان می‌دهد (شکل ۵).

مقدار متوسط نسبت Co/Ni در نمونه‌های آهن منطقه مورد بررسی ۰٫۷۳ می‌باشد که در گستره ذخایر آهن گرمابی قرار می‌گیرد [۱۱] و موقعیت نمونه‌های آهن کانسار بالستان در نمودار Co-Ni [۱۲] بیانگر خاستگاه گرمابی این کانسار است (شکل ۶). مقدار بسیار پایین عناصر فسفر (کمتر از ۴۷ ppm) همراه با بالا بودن مقدار عنصر کروم (جدول ۱) و نسبت Co/Ni در کانسار آهن بالستان در مقایسه با این مقادیر در انواع ذخایر آهن، خاستگاه ماگمایی این کانسار را رد و خاستگاه گرمابی را تایید می‌کند.

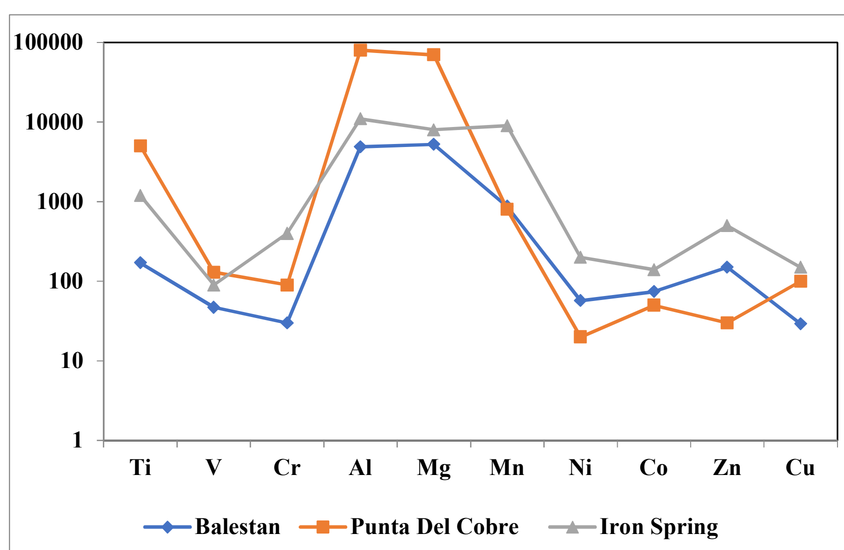
زمین شیمی عناصر خاکی نادر

مجموع مقادیر عناصر خاکی نادر (REE) در نمونه‌های آهن کانسار بالستان ۱۸۰ ppm و مقدار میانگین آنها ۳۴ ppm بوده که به نسبت نزدیک به حد پایینی میانگین این عناصر در ذخایر نوعی گرمابی (در گستره ۳۰۰-۲۵ ppm) [۱۳] است. پایین بودن مقدار مجموع عناصر خاکی نادر (میانگین ΣREE) در منطقه مورد بررسی می‌تواند به دلیل کم بودن مقدار فلوئور در سیال گرمابی کانه‌زای حامل آهن باشد. به باور تایلور و همکاران [۱۴]، عناصر خاکی نادر سبک (LREE) تمایل به حضور در سیال‌های غنی از کلر دارند، در حالی که سیال‌های فلوئوردار غنی از عناصر خاکی نادر سنگین (HREE) هستند. بنابراین بالا بودن مقدار عناصر خاکی نادر سبک نسبت به عناصر خاکی نادر سنگین می‌تواند به دلیل وجود سیال‌های غنی از کلر در کانسار بالستان می‌تواند باشد.

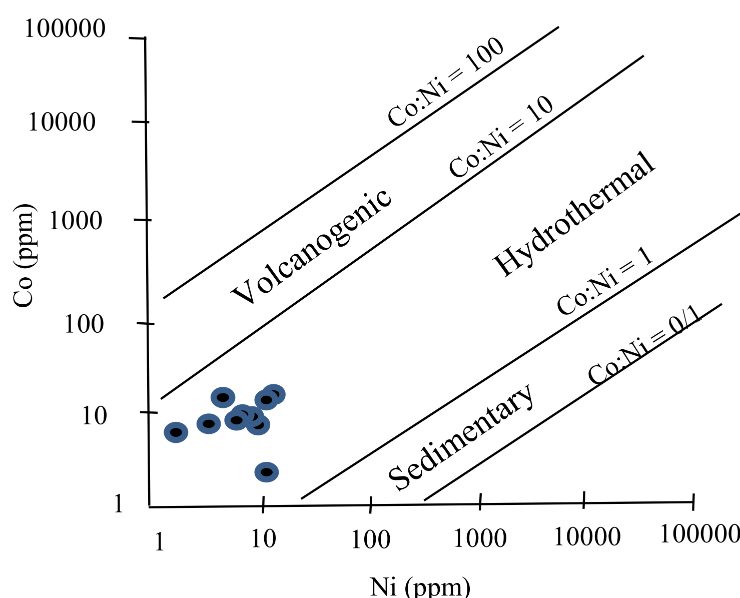
جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر فرعی و کمیاب (بر حسب ppm) در نمونه‌های کانسنگ آهن بالستان.

نمونه	BA-P1-S1	BA-P1-S2	BA-P1-S3	BA-P1-S4	BA-P1-S5	BA-P2-S1	BA-P2-S2	BA-P2-S3	BA-P2-S4	BA-P2-S5
Ba	۹٫۰۰	۵۸٫۰۰	۵۱٫۰۰	۳۸٫۰۰	۲۱٫۰۰	۳۷٫۰۰	۱۱۵٫۰۰	۵۹٫۰۰	۱۱۶٫۰۰	۳۵٫۰۰
Co	۱۹٫۰	۲۵۵٫۵	۱۱٫۴	۲۸٫۹	۲۳٫۴	۶۲٫۲	۱۶٫۶	۱۰۱٫۰	۱۹۰٫۱	۳۵٫۲
Cs	۰٫۲	۳٫۹	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۲	۰٫۳	۴٫۹	۰٫۷	۳٫۷
Ga	۲۰٫۹	۱۶٫۲	۵٫۸	۱۵٫۷	۱۴٫۶	۱۱٫۱	۱۴٫۹	۱۴٫۹	۳٫۲	۱۲٫۰
Hf	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱<	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵	۳٫۱	۰٫۲
Nb	۴٫۶	۰٫۷	۰٫۱<	۱٫۹	۰٫۲	۰٫۱<	۰٫۷	۴٫۵	۱۱٫۴	۰٫۵
Rb	۱٫۷	۲۰٫۷	۹٫۳	۴٫۹	۷٫۷	۶٫۶	۲۱٫۰	۷۴٫۷	۱۳٫۹	۸۷٫۱
V	۹۵٫۰۰	۶۰٫۰۰	۳۵٫۰۰	۳۰٫۰۰	۴۴٫۰۰	۵۱٫۰۰	۶۵٫۰۰	۳۸٫۰۰	۲۶٫۰۰	۳۴٫۰۰
Sr	۲۰٫۰	۱۵۰٫۴	۴۶٫۲	۳۹٫۵	۱۱٫۰	۱۱۸٫۶	۱۷٫۳	۵٫۶	۲۸٫۴	۴۵٫۳
Ta	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱	۰٫۶	۰٫۱<
Th	۳٫۹	۴۵٫۹	۰٫۲<	۲٫۲	۰٫۲<	۰٫۲<	۰٫۲	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۳
Zr	۳٫۲	۷٫۵	۱٫۴	۹٫۶	۳٫۹	۴٫۵	۴٫۳	۲۲٫۲	۱۰۱٫۹	۴٫۶
Pb	۴۱٫۲	۸۲٫۹	۱۰٫۲	۲۷٫۴	۶٫۵	۱۹۱٫۹	۹٫۸	۴۹٫۵	۷۲٫۵	۸٫۴
Ni	۲۵٫۶	۱۷۵٫۴	۱٫۶	۱۶٫۵	۱۱٫۴	۳۱٫۴	۱۱٫۴	۱۸٫۵	۲۷۴٫۱	۴٫۵
Cr	۳۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴	<۱۴
Tl	۰٫۱<	۰٫۲	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۱<	۰٫۴	۰٫۱<	۰٫۴
As	۱۳٫۴	۷۹٫۱	۸٫۷	۶۰٫۰	۷٫۹	۴۰٫۶	۵٫۶	۱۱۰٫۴	۲۲۹۹٫۶	۱۶٫۹
Cd	۰٫۵	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱<	۰٫۲	۰٫۶	۰٫۲	۰٫۳	۱٫۲	۰٫۹
Sb	۲٫۹	۱٫۵	۱٫۵	۲۲٫۳	۱٫۲	۲٫۱	۲٫۲	۲٫۰	۲٫۰	۰٫۸
Cu	۴٫۰	۴۸٫۲	۲٫۰	۲۳٫۶	۱۲٫۱	۴۰٫۷	۴۱٫۷	۴۳٫۵	۵۶٫۱	۱۹٫۸
Mo	۰٫۶	۱۶٫۵	۱٫۵	۰٫۹	۰٫۹	۳٫۴	۶٫۰	۱۳٫۲	۳۳٫۰	۱٫۲
Zn	۱۹۶٫۰۰	۹۵٫۰۰	۴۹٫۰۰	۴۸٫۰۰	۱۱۲٫۰۰	۱۶۲٫۰۰	۱۰۰٫۰۰	۴۱۴٫۰۰	۱۹۰٫۰۰	۱۳۴٫۰۰
Y	۴٫۳	۱۸٫۲	۳٫۱	۴٫۳	۱٫۹	۵٫۹	۳٫۰	۱۳٫۴	۳۱٫۴	۵٫۹
La	۱۰٫۳	۳۲٫۸	۰٫۶	۲٫۸	۰٫۵	۱٫۵	۰٫۸	۲٫۲	۶٫۸	۲٫۱
Ce	۲۰٫۹	۷۶٫۵	۰٫۷	۳٫۰	۰٫۹	۳٫۲	۱٫۳	۳٫۳	۱۳٫۶	۲٫۷
Pr	۲٫۴۳	۹٫۲۶	۰٫۱۳	۰٫۲۸	۰٫۱۰	۰٫۴۹	۰٫۲۲	۰٫۵۵	۱٫۸۹	۰٫۴۰
Nd	۹٫۷	۳۷٫۸	۰٫۴	۱٫۱	۰٫۴	۱٫۹	۰٫۶	۲٫۹	۷٫۸	۱٫۶
Sm	۱٫۱۷	۷٫۶۴	۰٫۰۵<	۰٫۳۴	۰٫۱۱	۰٫۶۶	۰٫۲۹	۰٫۹۳	۳٫۰۱	۰٫۶۲
Eu	۰٫۲۲	۰٫۹۲	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۱۹	۰٫۱۰	۰٫۱۴	۰٫۹۹	۰٫۱۸
Gd	۱٫۰۷	۶٫۸۷	۰٫۲۱	۰٫۳۴	۰٫۱۸	۰٫۹۳	۰٫۳۶	۱٫۵۹	۴٫۷۰	۰٫۹۵
Tb	۰٫۱۹	۱٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۴	۰٫۱۷	۰٫۰۷	۰٫۳۵	۰٫۹۵	۰٫۱۹
Dy	۰٫۹۰	۴٫۲۹	۰٫۳۷	۰٫۶۱	۰٫۲۵	۱٫۰۰	۰٫۳۶	۲٫۰۰	۵٫۶۳	۱٫۱۶
Ho	۰٫۱۵	۰٫۷۲	۰٫۰۸	۰٫۱۶	۰٫۰۸	۰٫۲۰	۰٫۰۷	۰٫۴۸	۱٫۰۳	۰٫۲۰
Er	۰٫۴۵	۱٫۴۵	۰٫۱۶	۰٫۵۷	۰٫۲۶	۰٫۵۷	۰٫۳۰	۱٫۵۱	۳٫۲۷	۰٫۵۱
Tm	۰٫۰۶	۰٫۱۶	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۱۹	۰٫۳۸	۰٫۰۷
Yb	۰٫۳۲	۰٫۹۶	۰٫۲۶	۰٫۴۱	۰٫۳۰	۰٫۶۴	۰٫۳۳	۱٫۱۴	۲٫۶۸	۰٫۵۵
Lu	۰٫۲۰	۰٫۱۱	۰٫۰۹	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۱۳	۰٫۰۷	۰٫۲۰	۰٫۴۴	۰٫۱۸
W	۷٫۰	۲۰٫۴	۲٫۵	۰٫۵<	۳٫۳	۹٫۰	۳٫۷	۳٫۱	۱۰٫۹	۰٫۵<
Ag	۰٫۲	۱٫۴	۰٫۱<	۰٫۷	۰٫۲	۱٫۸	۰٫۱<	۰٫۲	۳٫۳	۰٫۱
Au	۲۵٫۸	۲۱٫۱	۲۳٫۰	۱۴٫۸	۸٫۸	۱۰٫۰	۱٫۲	۱۲٫۱	۳۸٫۷	۶٫۷
Bi	۰٫۶	۵٫۴	۰٫۶	۱۱٫۰	۰٫۵	۴٫۲	۰٫۲	۱٫۵	۸٫۰	۰٫۴
Hg	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱<	۰٫۰۲	۰٫۰۱<	۰٫۰۱<	۰٫۰۷	۰٫۰۱<
Be	۱۳٫۰۰	۶٫۰۰	۷٫۰۰	۱۲٫۰۰	۱٫۰۰	۸٫۰۰	۲٫۰۰	۴٫۰۰	<۱	۲٫۰۰
Sc	۳٫۰۰	۴٫۰۰	<۱	۲٫۰۰	<۱	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۱٫۰۰	۶٫۰۰	۲٫۰۰
Se	۱٫۶	۲۰٫۰	۰٫۸	۲٫۷	۰٫۵<	۲٫۱	۰٫۵<	۱٫۴	۷٫۹	۰٫۷
Sn	۵٫۰۰	۳٫۰۰	<۱	۱٫۰۰	<۱	<۱	۱٫۰۰	<۱	<۱	<۱
U	۰٫۸	۲٫۱	۱٫۰	۱٫۴	۰٫۷	۱٫۰	۱٫۳	۲٫۹	۴٫۸	۰٫۶
ΣREE	۴۸٫۰۶	۱۸۰٫۵۶	۳٫۲۰	۹٫۸۷	۳٫۲۶	۱۱٫۶۶	۴٫۹۰	۱۷٫۴۸	۵۳٫۱۷	۱۱٫۴۱
LREE	۴۵٫۷۹	۱۷۱٫۷۹	۲٫۱۳	۷٫۹۰	۲٫۲۴	۸٫۸۷	۳٫۶۷	۱۱٫۶۱	۳۸٫۷۹	۸٫۵۵
HREE	۲٫۲۷	۸٫۷۷	۱٫۰۷	۱٫۹۷	۱٫۰۲	۲٫۷۹	۱٫۲۳	۵٫۸۷	۱۴٫۳۸	۲٫۸۶
La/Lu	۵۱٫۵۰	۲۹۸٫۱۸	۶٫۶۷	۴۰٫۰۰	۸٫۳۳	۱۱٫۵۴	۱۱٫۴۳	۱۱٫۰۰	۱۵٫۴۵	۱۱٫۶۷
Eu/Eu	۰٫۶۰	۰٫۳۹	۲٫۵۳	۰٫۳۶	۱٫۰۹	۰٫۷۴	۰٫۹۵	۰٫۳۵	۰٫۸۰	۰٫۷۲
Co/Ni	۰٫۷۴	۱٫۴۵	۷٫۱۲	۱٫۷۵	۲٫۰۵	۱٫۹۸	۱٫۴۵	۵٫۴۵	۰٫۰۷	۷٫۸۲
Cr/V	۰٫۳۶	۰٫۲۳	۰٫۴۰	۰٫۴۷	۰٫۳۲	۰٫۲۷	۰٫۲۲	۰٫۳۷	۱٫۳۱	۰٫۴۱

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]



شکل ۵ مقایسه میانگین عناصر واسطه و تعدادی از عناصر اصلی در دو نوع کانسار گرمابی آیرون اسپرینگز [۸] ، پونتاول کوبره [۹] و ایگاراپیاباهیا [۱۰] با کانسار آهن بالستان.



شکل ۶ نمودار کبالت نسبت به نیکل و موقعیت نمونه‌های کانسنگ آهن بالستان در آن [۱۱].

در این پژوهش، از کندریت‌ها به دلیل تغییرپذیری زمین-شیمیایی بسیار کم آنها نسبت به مقادیر مشابه موجود در گوشته و پوسته، برای بهنجار کردن مقادیر عناصر خاکی نادر استفاده شد. نمودارهای عنکبوتی عناصر خاکی نادر نمونه‌های آهن پس از بهنجار شدن به کندریت [۱۵] یک شیب منفی با غنی شدگی از LREEها نسبت به HREE ها نشان می‌دهند (شکل ۷). غنی‌شدگی LREE ها نسبت به HREE ها نشان دهنده تفکیک عناصر طی سرد شدن سیال گرمابی است [۱۶].

بالا بودن مقدار LREEها و کاهش دما و افزایش pH سیال-های دگرسان کننده با گذشت زمان به همراه ناپایدار شدن کمپلکس‌های حامل LREEها نقش مهمی در افزایش نسبت LREE/HREE داشته‌اند [۱۷]. نسبت‌های بالای LREE/HREE و La/Lu از ویژگی‌های کانسارهای آهن گرمابی است [۱۸]. میانگین بی‌هنجاری Eu/Eu* در کانسار آهن بالستان ۰/۶۳ بوده که وجود این بی‌هنجاری منفی نشان دهنده خاستگاه گرمابی این کانسار است. سیال‌های گرمابی بر

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]

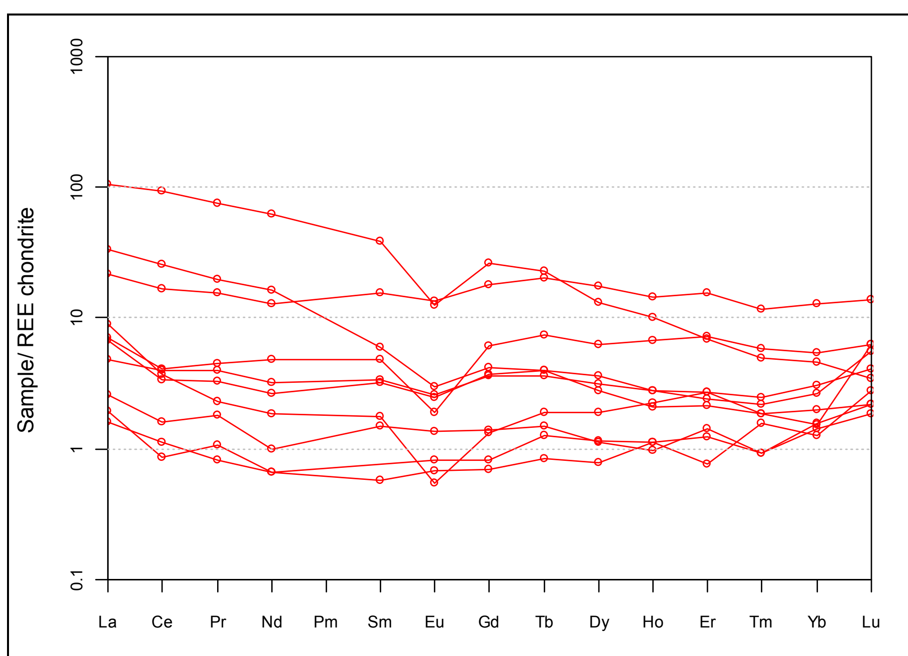
غلظت REEها اثر گذاشته و سبب غنی‌شدگی یا تهی‌شدگی برخی از عناصر می‌شود. تهی‌شدگی Eu می‌تواند ناشی از عملکرد فرایندهای گرمابی و شرایط احیایی شدید باشد که منجر به تبدیل Eu از حالت سه‌ظرفیتی به دوظرفیتی و خروج آن به طور بخشی از سامانه شود [۱۹]. به طور کلی، بی‌هنجاری منفی Eu ، نسبت La/Lu بیشتر از یک غنی‌شدگی شدید LREEها نسبت به HREEها و مقایسه الگوی کلی عناصر خاکی نادر در ذخیره آهن بالستان با ذخایر آهن گرمابی و ماگمایی نشان دهنده خاستگاه گرمابی کانسار آهن بالستان است.

بررسی‌های میکروسکوپی و ریزدماسنجی سیال‌های درگیر

برای بررسی سیال‌های درگیر از دو نمونه رگه کوارتز خاکستری کانه‌دار (دارای مگنتیت) استفاده شد. بررسی این کانی‌ها نشان می‌دهد که اندازه سیال های درگیر در کانسار آهن بالستان در گستره ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است. با این وجود، بیشتر سیال‌های درگیر اندازه‌ای حدود ۱۰ میکرون دارند. بر اساس تعداد فازهای سیال‌های درگیر [۲۰]، ۳ نوع میانبار سیال در کانسار آهن بالستان نوع A- تک فازی دارای گاز، نوع B - دو فازی غنی از مایع و نوع C - دو فازی غنی از گاز تشخیص داده شد.

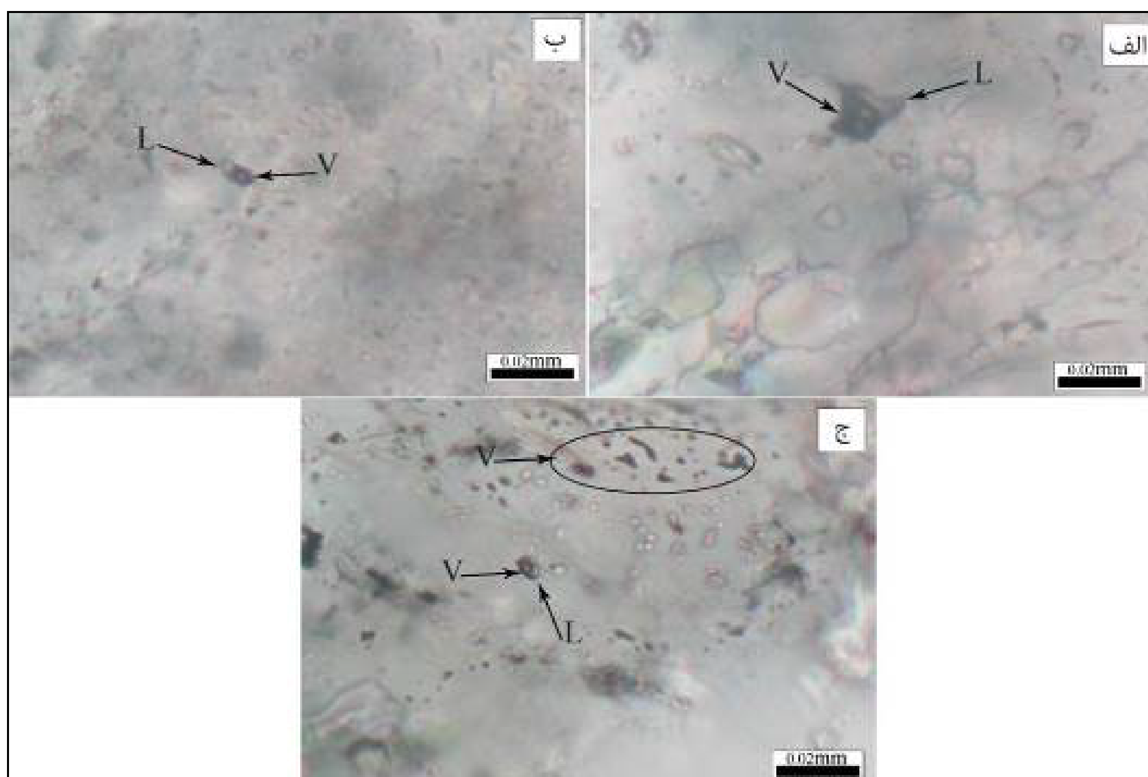
در میانبارهای دوفازی غنی از گاز با اندازه ۴ تا ۱۰ میکرون، حباب گاز بیشترین حجم سیال را دربرگرفته است. گاهی بیش از ۷۰ درصد حجم سیال را حباب گاز فراگرفته است. فراوانی این نوع از سیال‌های درگیر و همراهی آنها با انواع دوفازی غنی از مایع و تک فازی گازی نشان دهنده فرایند جوشش است [۲۱]. این نوع از میانبار فراوانی زیادی دارد و بیشتر به شکل نامنظم و به ندرت به صورت منظم و بیضوی شکل دیده می‌شود (شکل ۸ الف).

در میانبارهای دوفازی غنی از مایع، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد و بیشترین حجم میانبار سیال را فاز مایع در برمی‌گیرد. فاز گازی تنها ۱۰ تا ۴۰ ٪ حجم سیال‌های درگیر بررسی شده را شامل می‌شود. این نوع سیال‌های درگیر به شکل‌های نامنظم و بیضوی و با اندازه‌ی ۵ تا ۱۵ میکرون بیشترین نوع سیال‌های درگیر بررسی شده در نمونه‌ها هستند (شکل ۸ ب). در میانبارهای تک فاز دارای گاز، حباب گاز تنها فاز تشکیل دهنده است. این میانبارها فراوانی به نسبت زیادی در نمونه‌ها دارند و بیشتر به شکل نامنظم و بیضوی و به رنگ تیره دیده می‌شود. اندازه‌ی آنها از ۲ تا ۱۵ میکرون متغیر است (شکل ۸ پ). این میانبارها همراه با میانبارهای دو فازی غنی از مایع و گاز دیده شده‌اند که می‌توانند از شواهد فرایند جوشش باشد [۲۱].



شکل ۷ نمودار عناصر خاکی نادر نمونه‌های کانسنگ آهن بالستان بهنجار شده نسبت به کندریت [۱۵].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]



شکل ۸ انواع سیال‌های درگیر دیده شده در کانی کوارتز در کانسار آهن بالستان: الف) دو فازی غنی از گاز، ب) دو فازی غنی از مایع و پ) تک فازی گازی.

نتایج ریزدماسنجی سیال‌های درگیر کانسار آهن بالستان در جدول ۳ آورده شده است. شکل ۹ الف دمای ذوب آخرین قطعه یخ را نشان می‌دهد. دمای ذوب آخرین بلور یخ در کانسار بالستان بین ۲- تا ۹٫۵- درجه‌ی سانتی‌گراد با فراوانی در گستره‌ی ۴- تا ۲- درجه‌ی سانتی‌گراد تعیین گردید. دمای همگن‌شدگی در دو گستره دمایی ۱۶۵ تا ۴۳۹ درجه‌ی سانتی‌گراد و ۲۵۰ تا ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به دست آمد (شکل ۹ ب). مقدار شوری سیال‌های کانی‌ساز بین ۳ تا ۱۲ درصد وزنی نمک طعام می‌باشد که در گستره‌ی ۴ تا ۶ درصد بیشترین فراوانی را دارد (جدول ۳ و شکل ۹ پ).

به منظور تعیین عوامل فیزیکوشیمیایی موثر بر تـه نشست کانسار، باید انواع سیال‌های درگیر در منطقه مورد بررسی مشخص و ارتباط احتمالی آنها با فرآیندهایی چون جوشش، سردشدن و آمیختگی سیال‌ها مشخص شود. بر پایه داده‌های شوری و دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر می‌توان به این امر پی برد. مناسب‌ترین روش برای نشان دادن این ارتباط نمایش داده‌ها بر نمودار دو متغیره شوری-دمای همگن‌شدگی است که بر پایه آن فرآیندهای موثر در دگرگونی و تغییر سیال کانه‌دار و در نتیجه نهشت عناصر کانساری از آن مشخص می‌شوند (شکل ۱۰ الف). براین اساس، در کانسار آهن بالستان، روند غالب دگرگونی سیال کانه‌دار سردشدگی یا زیر فشار بودن است [۲۲].

به منظور تعیین چگالی سیال‌های کانی‌ساز در کانسار آهن بالستان، از نمودار دمای همگن‌شدگی-شوری استفاده شد (شکل ۱۰ ب) [۲۳]. چگالی اهمیت ویژه‌ای در فرآیند جریان سیال دارد. با افزایش شوری سیال‌های درگیر، چگالی سیال افزایش می‌یابد [۲۴]. ویکینسان [۲۴] خروج فاز گازی و تولید حباب را موجب افزایش چگالی سیال باقی مانده می‌داند که منجر به چگالش سیال می‌شود. چگالی کانسار آهن بالستان براساس نمودار دمای همگن‌شدگی- شوری در گستره ۰٫۶ تا 1g/cm3 است (شکل ۱۰ ب).

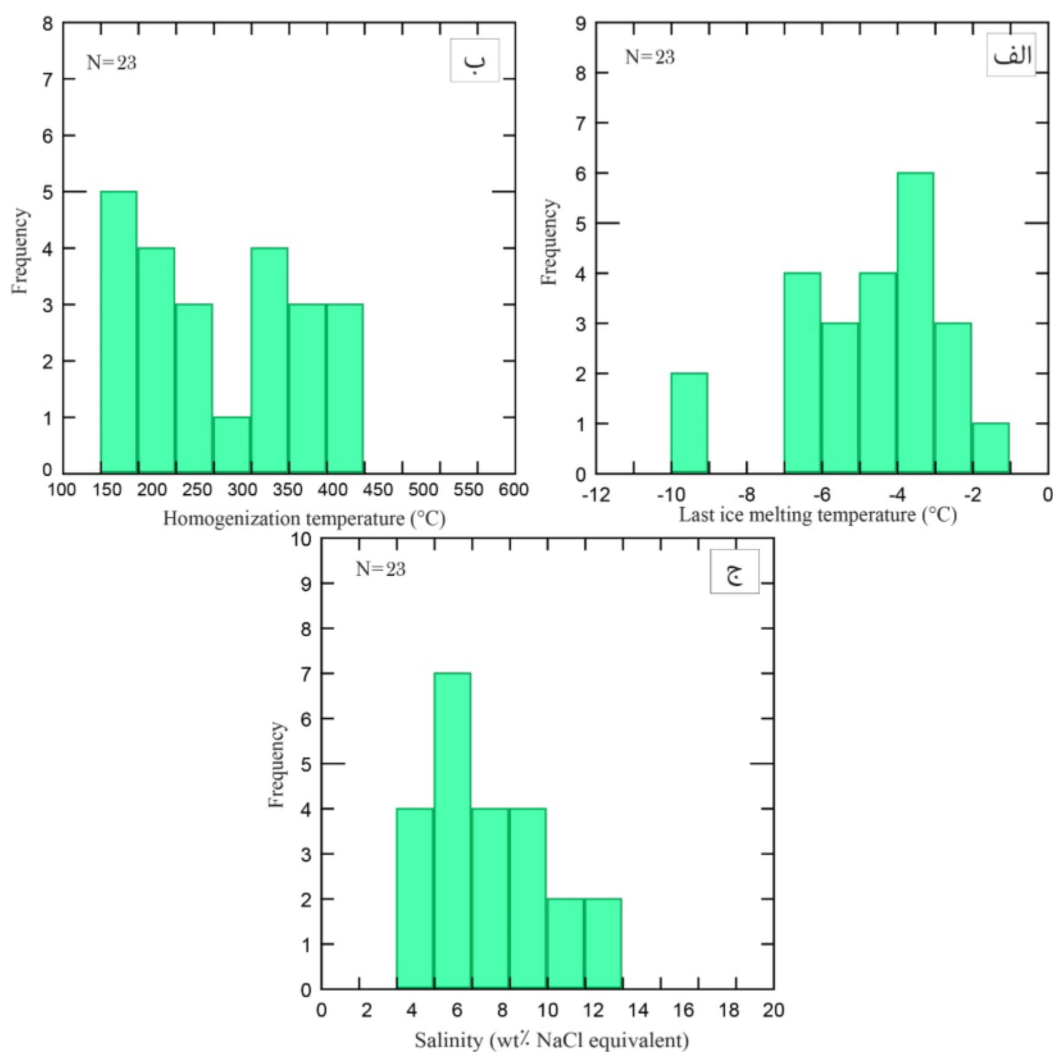
در این پژوهش، خاستگاه کانسار آهن بالستان، بر پایه مقدار شوری و دمای همگن‌شدگی به دست آمده آزمایش ریزدماسنجی سیال‌های درگیر و نمودار شوری - دمای همگن شدگی [۲۴] تعیین گردید (شکل ۱۱). در این نمودار انواع اصلی ذخایر معدنی بر اساس دمای همگن‌شدگی و شوری

مشخص شده است. این ذخایر گستره وسیعی از شوری و دمای همگن‌شدگی را شامل شده و ویژگی‌های اساسی سیال‌های درگیر را طی تشکیل بیان می‌کنند. با جایابی مقادیر دما و شوری به دست آمده از سیال‌های درگیر در این نمودار، کانسار مورد بررسی در گستره ذخایر متوسط دما قرار دارد (شکل ۱۱). این امر با شرایط گزارش شده برای کانسارهای گرمابی [۲۵، ۲۶] نیز تایید می‌شود.

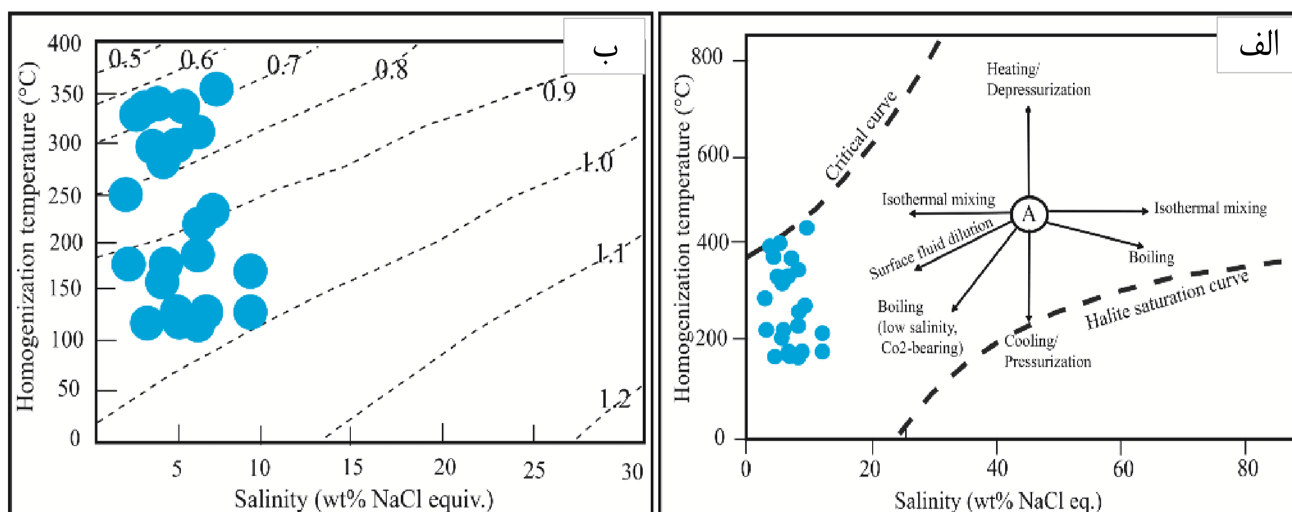
جدول ۳ نتایج ریزدماسنجی سیال‌های درگیر کانسار آهن بالستان. (دمای ذوب اولین قطعه یخ :**Tice**، دمای ذوب آخرین قطعه یخ :**Tice+** ، دمای همگن‌شدن میانبار تک فاز گازی :**Th V-l** ، دمای همگن‌شدگی میانبار دو فازی غنی از مایع :**Th L-V** ، دمای همگن شدگی :**Th t**، دمای ذوب اولین:**Tutec** ، کوارتز :Qtz .

	Sample	Fluid inclusion type	Mineral	Phase	Tice	Tice+	Salinity	Th V-l	Th L-V	Th t	Tutec
۱	BL.P1.S5	P	Qtz	L-V	-۳/۲۰	۳/۲۰	۵/۲۴	۱۶۰		۱۶۰	
۲	BL.P1.S5	P	Qtz	V+L	-۶/۸۰	۶/۸۰	۱۰/۰۶		۴۲۵	۴۲۵	
۳	BL.P1.S5	P	Qtz	V+L	-۴/۱۰	۴/۱۰	۶/۵۵		۳۷۰	۳۷۰	
۴	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۹/۴۰	۹/۴۰	۱۲/۸۳	۱۷۲		۱۷۲	
۵	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۲/۱۰	۲/۱۰	۳/۵۴	۲۱۶		۲۱۶	-۴۲
۶	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۳/۷۰	۳/۷۰	۵/۹۸	۲۱۳		۲۱۳	
۷	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۷/۰۰	۷/۰۰	۱۰/۲۹	۲۶۵		۲۶۵	
۸	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۳/۵۰	۳/۵۰	۵/۶۹	۳۱۵		۳۱۵	
۹	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۵/۳۰	۵/۳۰	۸/۱۹	۱۶۵		۱۶۵	
۱۰	BL.P1.S5	p	Qtz	V+L	-۳/۴۰	۳/۴۰	۵/۵۴	۳۹۸		۳۹۸	
۱۱	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۵/۷۰	۵/۷۰	۸/۷۱	۳۴۵		۳۴۵	
۱۲	BL.P1.S5	p	Qtz	L-V	-۶/۱۰	۶/۱۰	۹/۲۱	۲۶۴		۲۶۴	
۱۳	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۴/۵۰	۴/۵۰	۷/۱۱	۳۳۵		۳۳۵	
۱۴	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۵/۸۰	۵/۸۰	۸/۸۴	۲۳۰		۲۳۰	
۱۵	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۲/۶۰	۲/۶۰	۴/۳۳	۳۹۶		۳۹۶	
۱۶	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۳/۷۰	۳/۷۰	۵/۹۸	۱۹۵		۱۹۵	
۱۷	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۹/۵۰	۹/۵۰	۱۲/۹۲	۲۰۶		۲۰۶	
۱۸	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۲/۶۰	۲/۶۰	۴/۳۳	۳۷۳		۳۷۳	-۴۴
۱۹	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۶/۳۰	۶/۳۰	۹/۴۶	۱۶۸		۱۶۸	
۲۰	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۴/۵۰	۴/۵۰	۷/۱۱	۱۷۳		۱۷۳	
۲۱	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۳/۱۰	۳/۱۰	۵/۰۹	۳۲۷		۳۲۷	
۲۲	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۲/۰۰	۲/۰۰	۳/۳۸	۲۸۰		۲۸۰	
۲۳	BL.P2.S4	p	Qtz	L-V	-۴/۸۰	۴/۸۰	۷/۵۳	۳۶۵		۳۶۵	

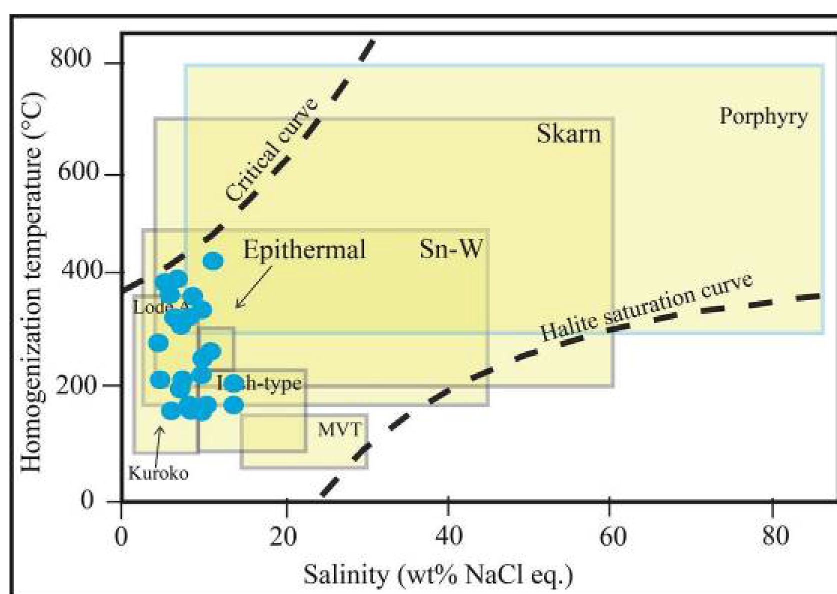
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]



شکل ۹ نمودارهای ستونی الف) آخرین نقطه ذوب یخ، ب) دمای همگن شدگی با دو گستره دمایی و پ) شوری در سیال های درگیر کانسار آهن بالستان.



شکل ۱۰ الف) نمودار دمای همگن‌شدگی مایع-گاز سیال‌های درگیر کانسار نسبت به شوری در سامانه $NaCl-H_2O$ [۲۰] و ب) نمودار شوری-دما برای محاسبه چگالی سیال‌های درگیر [۲۱].



شکل ۱۱ موقعیت داده‌های سیال‌های درگیر کانسار آهن بالستان بر روی نمودار دمای همگن شدگی- شوری برای تعیین نوع کانی‌سازی [۲۴].

ویژگی‌های ذخایر نوع متوسط دما عبارتند از: ۱) اندازه بسیار کوچک میانبارها (کمتر از ۶۴ میکرون)، درحالی که در ذخایر فراگرمایی، اندازه میانبارها بیشتر از ۴۵۴ میکرون است [۲۷]، ۲) وجود میانبارهای دو فازی به دلیل شوری کم تا متوسط [۲۸] و ۳) وجود میانبارهای غالب از نوع دوفازی غنی از مایع. در این نوع ذخایر، ترکیب همگن اولیه میانبارهای چند فازی در اثر کاهش فشار یا کاهش دما، به میانبارهای تک فازی غنی از گاز تبدیل می‌شود. در کانسار مورد بررسی، میانبارهای اولیه تک فازی گازی همراه با میانبارهای اولیه دوفازی مایع- گاز غنی از گاز دیده شده‌اند که از شواهد فرایند جوشش است. همگن‌شدگی در این نوع از میانبارها با تشکیل بخار همراه است. جوشش و آمیختگی سیال‌ها دو عامل مهمی هستند که اغلب شرایط لازم برای ته‌نشست کانسارها را فراهم می‌آورند و باعث ابر اشباع شدن سریع سیال گرمابی در سنگ‌ها و ته نشست کانی‌ها می‌شوند. همچنین وجود میانبارهای تک فاز گازی در کانسار آهن بالستان تایید کننده پدیده جوشش است [۲۴].

ویژگی‌هایی چون اندازه کوچک میانبارها (کم تر از ۲۰ میکرون)، شوری کم تا متوسط سیال‌های کانه‌زا، دماهای همگن‌شدگی بین ۱۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و حضور میانبارهای دو فازی به شدت غنی از آب نشان دهنده تشکیل کانسار آهن بالستان در گستره کانسارهای آهن متوسط‌دما هستند. در چنین شرایطی، فرآیندهایی چون سردشدگی، حباب‌زایی، چگالش، آمیختگی هم‌دما در نتیجه آمیختگی سیال‌های ماگمایی با سیال‌های جوی یا واکنش سیال‌های با سنگ میزبان کربناتی و تغییر ترکیب شیمیایی سیال و تغییر pH باعث نهشت آهن شده است.

در محیط‌های متوسط دما که میانبارها با پدیده آمیزش مواجه شده‌اند، دما کمتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و شوری کمتر از ۱۵ درصد وزنی نمک طعام است [۲۴]. در این شرایط، میانبارهای غنی از CO_2 در مناطق کانه‌زایی ایجاد می‌شوند. با وجود این، میانبارهای کانسارهای آهن گرمابی با عمق متوسط از آمیختگی سیال‌های ماگمایی با سیال جوی یا آب دریا تشکیل شده‌اند.

وجود سیال‌های با شوری پایین، فازهای سیال پیش از جوشش را نشان می‌دهد و سیال‌های با شوری بالا بیانگر سیال- های پس از جوشش غیر بی در رو در یک سامانه باز هستند. این سازوکار نشانگر به دام افتادن همزمان سیال‌های با شوری‌های متفاوت است [۲۹]. وجود دو گستره شوری کم و زیاد در کانسار آهن بالستان نشان می‌دهد که سیال‌هایی از انواع مختلف در کانه‌زایی مشارکت داشته‌اند.

برداشت

۱- در کانسار آهن بالستان، کانه‌زایی در راستای سطوح شیستوارگی سنگ میزبان رخ داده است. مگنتیت فراوان‌ترین

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.3.9.4]
[DOI: 10.61186/ijcm.31.3.537]

کانه فلزی موجود در این کانسار بوده که در پهنه‌های هوازده و با شکستگی‌های فراوان به هماتیت و لیمونیت تبدیل شده است. پیریت و کالکوپیریت به ترتیب فراوان‌ترین کانی‌ها پس از مگنتیت هستند که در پهنه کانه‌دار و همراه با مگنتیت یافت می‌شوند.

۲- بر اساس موقعیت نمونه‌های کانسنگ آهن بالستان در نمودار اکسید آهن- اکسید آلومنیم- اکسید منگنز، این کانسار در گستره کانسارهای گرمابی آهن قرار دارد.

۳- مقایسه الگوهای فراوانی عناصر کمیاب چون Cr، V، Co، Ni، Cu و Zn و اکسیدهای اصلی مانند Al، Mn، Mg و Ti در کانسار آهن بالستان با عناصر مشابه در کانسارهای آهن نوع گرمابی شباهت بسیاری را بین این کانسارها نشان می‌دهد.

۴- مقدار میانگین عناصر خاکی نادر کانسار آهن بالستان ppm ۳۴ بوده که نزدیک حد پایینی میانگین این عناصر در ذخایر گرمابی (۳۰۰-۲۵ ppm) است. وجود مقادیر بالای LREEها نسبت به HREEها که ویژگی کانسارهای آهن گرمابی بوده بیانگر غنی بودن سیال از کلر و نقش ارزنده کلر در انتقال عناصر خاکی نادر سبک در کانسار آهن بالستان است. از سویی، نسبت بالای LREE/HREE، بی هنجاری منفی Eu (۰٫۶۳) و La/Lu >1 بیانگر وجود ارتباط زایشی این کانسار با کانسارهای آهن گرمابی است.

۵- براساس ریزدماسنجی، میانگین شوری و دمای همگن‌شدگی سیال‌های درگیر به ترتیب حدود ۷٫۳۰ درصد وزنی معادل نمک طعام و ۲۷۶ درجه سانتی‌گراد است. روند تکاملی سیال-های درگیر گویای سردشدگی یا زیر فشار بودن است. بر اساس مقادیر دماهای همگن‌شدگی و شوری به دست آمده، کانسار آهن بالستان در گستره کانسارهای متوسط دما قرار دارد. وجود میانبارهای تک فاز گازی نشان دهنده پدیده جوشش در این کانسار است. براساس نتایج سنگ‌نگاری و ریز دماسنجی، برخی از ویژگی‌های سیال‌های درگیر کانسار آهن بالستان که با کانسارهای متوسط دما مشترک هستند عبارتند از ۱) اندازه کوچک میانبارها (کم تر از ۲۰ میکرون)، ۲) شوری کم تا متوسط، ۳) دماهای همگن‌شدگی بین ۱۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد و ۴) حضور میانبارهای دو فازی غنی از فاز مایع.

قدردانی

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه ارومیه برخوردار بوده‌اند که به این وسیله نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین آن اعلام می‌دارند. نگارندگان، همچنین از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم مجله سپاسگزاری می‌نمایند.

مراجع

[1] Aghanabati, S.A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey of Iran. 606 p.

[2] Alavi Naeini M., Shahrabi M., Saeedi A., "*Geological Quadrangle Map of Urmia scale (1:250,000)*" , Geological Survey of Iran, Tehran (1985).

[3] Whitney, D.L. and Evans, B.W. ˝*Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals*˝, American Mineralogist 95 (2010) 185-187.

[4] Tavakoli P., Rostami A., Rasti S., "*Genesis of the Tang Zagh iron deposit by using mineralogical and geochemical data, Hormozgan province*", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2022) 129-140.

[5] Rajabzadeh M.A., Rasti S., " *Mineralization study on Dehbid magnetite deposit, Fars; usingmineralogical and geochemical data*", Journal of Economic Geology 3 (2012) 217-230.

[6] Russell, M.J., Solomon, M. and Walshe, J.L., "*The genesis of sediment-hosted, exhalative zinc+ lead deposits*", Mineralium Deposita, 16 (1) (1981) 113-127.

[7] Knipping, Jaayke L., Laura D. Bilenker, Adam C. Simon, Martin Reich, Fernando Barra, Artur P. Deditius, Markus Wälle, Christoph A. Heinrich, François Holtz, and Rodrigo Munizaga. "*Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes*", Geochimica et Cosmochimica Acta, 171 (2015) 15-38.

[8] Barker, D.S., "*Crystallization and alteration of quartz monzonite, Iron Springs mining district, Utah; relation to associated iron deposits*", *Economic Geology*, *90* (8) (1995) 2197-2217.

[9] Marschik, R. and Fontboté, L., "The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) deposits, Chile", *Economic Geology*, *96*(8) (2001) 1799-1826.

[10] Tallarico, Fernando HB, Bernardino R. Figueiredo, David I. Groves, Natalie Kositcin, Neal J. McNaughton, Ian R. Fletcher, and José L. Rego. "*Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit,*

saprolite of Tertiary alkaline volcanic rocks, Eastern Pontides, NE Turkey", Clay Minerals 41 (2006) 597-617.

[20] Shepherd T. J., Rankin A. H., Alderton, D. H., *"A practical guide to fluid inclusion studies"*, Glasgow, Blackie and Son (1985) 239.

[21] Simmons, S.F., Mauk, J.L. and Simpson, M.P., October. *"The mineral products of boiling in the Golden Cross epithermal deposit"* In New Zealand Minerals & Mining Conference Proceeding (2000) 29-31.

[22] Chou, I.M., *"Phase relations in the system NaCl-KCl-H2O. III: Solubilities of halite in vapor-saturated liquids above 445° C and redetermination of phase equilibrium properties in the system NaCl-H2O to 1000° C and 1500 bars"*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 5*1*(7) (1987) 1965-1975.

[23] Bodnar, R.J., *"A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids"* Economic Geology, 78(3) (1983) 535-542.

[24] Wilkinson, J.J., *"Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits", Lithos*, *55* (1-4) (2001) 229-272.

[25] Foster, R.P., *"Gold metallogeny and exploration",* Springer, London, (1996) 431.

[26] Robb, R., *"Introduction to ore-forming processes",* Book, Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing company, (2005).

[27] Rodder, E., *"Fluid inclusions in minerals: Reviews in Mineralogy"* (1984).

[28] Goldforb, R.J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D.I., Hart, C.J. and Gosselin, P., *"Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terran"* (2005).

[29] Scott, A.M. and Watanabe, Y., *"Extreme boiling" model for variable salinity of the Hokko low-sulfidation epithermal Au prospect, southwestern Hokkaido, Japan", Mineralium Deposita*, *33* (6) (1998) 568-578.

Carajás copper-gold belt, Brazil: An Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization." Economic Geology 100, no. 1 (2005): 7-28.

[11] Rajabzadeh M.A., Rasti S., *"Investigation on mineralogy, geochemistry and fluid inclusions of the Goushti hydrothermal magnetite deposit, Fars Province, SW Iran: a comparison with IOCGs"*, Ore Geology Reviews (2017) 82 93-107.

[12] Bajwah, Z.U., Seccombe, P.K. and Offler, R., *"Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia"*, Mineralium Deposita*, 22* (4) (1987) 292-300.

[13] Henderson, P., *"Rare earth element geochemistry"*, Elsevier, (1989) 510.

[14] Taylor, R.P. and Fryer, B.J., *"Rare earth element lithogeochemistry of granitoid mineral deposits", CIM (Can. Inst. Min. Metall.) Bull*, *76* (860) (1983) 74-84.

[15] Taylor Y, McLennan S. M., *"The continental crust: Its composition and evolution"*, 1st ed. Oxford, UK: Blackwell (1985).

[16] Castor, S.B. and Hedrick, J.B., *"Rare earth elements. Industrial minerals and rocks"*, (2006) 769-792.

[17] Patino L. C., Velbel M. A., Price J. R., Wade, J. A., "*Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and Guatemala*", Chemical Geology 202 (2003) 343–364.

[18] Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontbote , L., De Haller, A., Mark, G., Oliver, N. H. S., Marschik , R., *"Iron oxide - copper - gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin".* In: Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R .J., Richards, J. P, (eds) Economic Geology 100 Anniversary Volume, Littleton, *C*. O., Society of economic Geologists, (2005) 371-40.

[19] Arslan M., Kadir S., Abdioglu E., Kolayli H., "*Origin and formation of kaolin minerals in*